

# ESPELEOTEMES I MINERALS DE LES COVES DE LES ILLES BALEARIS

per Antoni MERINO <sup>1,2</sup>, Joan J. FORNÓS <sup>1</sup> i Angel GINÉS <sup>1,3</sup>

## Abstract

Caves in the Balearics are renowned by its remarkable scenic values due to the great variety and abundance of carbonate speleothems, whose mineralogy is mainly composed by calcite being aragonite relegated to a second place. Other minerals are also represented but in a very minority way, such as gypsum. This situation is due to the monotonous carbonate lithology that characterizes the Balearics geology. The mineral monotony is counterweighted by the utmost morphological diversity showed by the speleothems, being caused by diverse genetic processes and influenced by climatic as well as temporary factors. The following types of cave crystallizations are distinguished: dripping water speleothems, flowing water speleothems, capillarity speleothems, vadose subaqueous speleothems and littoral phreatic speleothems. On the other hand, a wide range of uncommon minerals have been identified linked to the hypogenic processes documented in southern Mallorca, which are related to a deep seated recharge connected with the geothermal anomalies existing in the area. The presence of bat populations in some caves results in a specific series of phosphate minerals.

## Resum

Les cavitats de les Balears es caracteritzen per presentar un elevat grau d'ornamentació, consistent en una gran variació de dipòsits d'espeleotemes que presenten de forma quasi exclusiva una mineralogia carbonatada en la que la calcita és el mineral predominant, quedant en un segon terme l'aragonita. Altres minerals hi són presents, però ja de forma molt minoritària, entre els que hi destaca el guix. Aquest fet és el resultat de la monòtona litologia carbonatada que caracteritza la geologia de les Illes Balears. Aquesta monotonia mineral es veu compensada per l'extrema diversitat morfològica que presenten els espeleotemes, i que és deguda al seu procés genètic i als factors climàtics i temporals en els quals s'han originat. S'hi descriuen espeleotemes de degoteig, espeleotemes de flux, espeleotemes produïts per capil·laritat, espeleotemes subaquàtics d'origen vadós i espeleotemes subaquàtics d'origen freàtic costaner. Per altra part, dins d'aquesta monotonia carbonatada, i en relació amb els processos d'hipogènesi lligats a les estructures tectòniques distensives presents al Migjorn de Mallorca, tenim tota una sèrie de minerals molt poc comuns relacionats amb l'aportació de determinats elements en solució per part de les aigües hipogèniques profundes. L'existència d'activitat biològica, normalment de ratapinyades, a l'interior de les coves dona lloc a la presència de determinats minerals fosfatats.

## Resumen

Las cavidades de Baleares se caracterizan por presentar un elevado grado de ornamentación, consistente en una gran variedad de depósitos de espeleotemas que presentan de forma casi exclusiva una mineralogía carbonatada en la que la calcita es el mineral predominante, quedando en segundo término el aragonito. Están también presentes otros minerales de forma muy minoritaria, destacando entre estos el yeso. Este hecho se debe a la monótona litología carbonatada que caracteriza la geología de las Islas Baleares. Dicha monotonía mineral se ve compensada por la extrema diversidad morfológica que presentan los espeleotemas, y que se debe a sus procesos genéticos y a los factores climáticos y temporales en los cuales se han formado. Se describen espeleotemas de goteo, espeleotemas de flujo, espeleotemas producidos por capilaridad, espeleotemas subacuáticos de origen vadoso y espeleotemas subacuáticos de origen freático costero. Por otra parte, dentro de esta monotonía carbonatada, y ligados a los procesos hipogénicos asociados a las estructuras tectónicas distensivas presentes en la zona meridional de Mallorca, hay toda una serie de minerales muy poco comunes relacionados con el aporte de determinados elementos en disolución por parte de las aguas hipogénicas profundas. La presencia de actividad biológica, normalmente murciélagos, en el interior de las cavidades da lugar a determinados minerales fosfatados.

1 Karst and Littoral Geomorphology Research Group. Universitat de les Illes Balears. Palma.

2 Grup Espeleològic de Llubí.

3 Grup Espeleològic EST. Palma.

## Introducció

Les cavitats subterrànies de les Illes Balears són prou conegudes des del segle XIX per la bellesa i abundància dels espeleotemes que les decoren i per la rica varietat de formes que presenten. Ben prest els llibres de viatges varen incloure descripcions elogioses de les formacions estalagmítiques de diverses coves balears i més particularment de les Coves d'Artà i les Coves del Drac (ambdues localitzades a la costa oriental de Mallorca), de manera que amb el temps aquestes coves varen gaudir d'una notable fama i esdevingueren recursos turístics molt apreciats al llarg del segle XX. L'atracció popular de la visita a les coves va impulsar l'adaptació i obertura al públic d'altres cavitats, i en la majoria dels casos eren precisament els exuberants conjunts de cristallitzacions el principal reclam que es volia mostrar als visitants. Certament, la presència massiva d'espeleotemes no constitueix un fet aïllat i excepcional a les coves de les Illes Balears sinó que, en tractar-se d'un fenomen tan generalitzable, suggereix l'existència a l'àrea balear d'uns condicionaments geoclimàtics òptims per a la cristallització, dipòsit químic i creixement d'una remarcable varietat d'espeleotemes (GINÉS, 1995a).

Durant les tres darreres dècades s'han portat a terme diverses prospeccions i estudis sistemàtics dels espeleotemes i minerals que es poden trobar a les coves balears; especialment a les cavitats de les illes de Mallorca i Menorca, i d'una manera molt menys exhaustiva a les illes Pitiüses i al subarxipèlag de Cabrera. Aquests coneixements, juntament amb nombroses descripcions de cavitats que inclouen dades més o manco detallades sobre els seus espeleotemes, han permès acumular una gran quantitat d'informació de caire morfològic i fins i tot han servit de base per a un primer assaig de classificació tipològica (GINÉS, 1995a). Recentment, s'han realitzat recerques més específiques sobre diverses mineralitzacions presents a diferents coves de Mallorca i s'han pogut identificar tot un seguit d'espècies minerals poc freqüents (ONAC *et al.*, 2005; MERINO *et al.*, 2009a); els resultats preliminars revelen un camp d'investigació potencialment obert a noves interessants troballes.

## Influència de la litologia en els minerals de les coves i tipus d'espeleotemes

La composició litològica de les roques que constitueixen les distintes illes de l'arxipèlag balear és bastant uniforme i la major part dels materials carbonatats carsificables es caracteritzen per presentar molt poques impureses; cal indicar que les escasses mineralitzacions d'òxids i sulfurs metàl·lics existents es troben associades a roques poc o gens solubles (GINÉS, 1995a). L'illa de Mallorca presenta notables dipòsits de roques d'edat mesozoica formats majoritàriament per calcàries juràsiques, a les quals acompanyen sediments margosos i

<b>estalactites</b>	A
<i>estalactites fistuloses</i>	A
<b>estalagmites</b>	A
<i>estalagmites isodiamètriques</i>	C
<b>columnes</b>	C
<b>banderes</b>	F
<b>conulites</b>	R
<b>colades pavimentàries</b>	A
<b>colades parietals</b>	A
<b>estalactites excèntriques</b>	C
<b>concrecions botrioidals</b>	C
<b>coral·loides</b>	F
<i>flors de guix</i>	R
<i>antodites d'aragonita</i>	R
<i>anemolites</i>	O
<b>helictites</b>	F
<i>helictites filiformes</i>	O
<i>helictites vermiformes</i>	F
<i>helictites en forma de banyes</i>	R
<i>heligmites</i>	O
<b>toveres</b>	R
<b>moonmilk</b>	F
<b>discos</b>	O
<b>gours</b>	C
<b>pisolites</b> (perles de les cavernes)	O
<b>calcita flotant</b>	C
<b>cons de calcita flotant</b>	R
<b>bombolles</b>	R
<b>plats</b>	R
<b>cornises</b>	O
<b>palmatòries</b>	R
<b>revestiments subaquàtics vadosos</b>	C
<b>revestiments subaquàtics freàtics</b>	F
<i>revestiments de calcita espàtica</i>	R
<i>revestiments subaquàtics d'aragonita</i>	R
<i>revestiments subaquàtics botrioidals</i>	O
<i>revestiments de coral·loides subaquàtics</i>	O
<b>engrossiments en bandes de nivell</b>	F
<b>estalactites globuloses i de base plana</b>	F

Taula 1: Abundància relativa d'espeleotemes (Escala ACFOR: A, abundant; C, comú; F, freqüent; O, ocasional; R, rar).

Table 1: Relative abundance of speleothems (ACFOR scale: A, abundant; C, common; F, frequent; O, occasional; R, rare).

alguns potents nivells de gresos triàsics; tots aquests dipòsits conformen el conjunt dels importants relleus de la Serra de Tramuntana, així com de les muntanyes de les Serres de Llevant i Centrals. D'altra banda, les acumulacions de sediments escullosos i calcarenífics postorogènics corresponents al Miocè superior formen les plataformes tabulars de la Marina de Migjorn i de les Marines de Llevant a la costa oriental mallorquina. L'illa d'Eivissa presenta una litologia prou semblant a la de les Serres de Llevant de Mallorca, amb dipòsits calcaris

i margosos. A les Pitiüses destaquen també els materials tabulars del Miocè superior, que afluïren de manera espectacular als penya-segats de l'illa de Formentera. I, finalment, l'illa de Menorca es pot dividir en dues meitats clarament diferenciades pel que fa a la seva composició litològica: una, situada cap al nord-est, i formada sobretot per roques silícies (gresos i pissarres); i l'altra, orientada cap al sud-oest, on predominen les roques tabulars postorogèniques del Miocè superior.

Tot aquest context de materials predominantment carbonatats i ben poc heterogenis, condiona que sigui la **calcita** el mineral més abundant -amb molta diferència- a les cavitats de les Illes Balears, seguida de l'**aragonita**, que forma part de diversos tipus d'espeleotemes menys freqüents, com ara certs ramells de cristal·litzacions parietals i alguns espeleotemes freàtics de creixement subaquàtic. Recentment s'ha constatat la presència de **guix** a distintes cavitats (ONAC *et al.*, 2005; GINARD *et al.*, 2006; MERINO, 2007) i l'existència de diversos minerals molt minoritaris a diferents coves (ONAC *et al.*, 2005; MERINO *et al.*, 2009a i 2009b; FORNÓS *et al.*, 2010), entre els quals cal enumerar: **hidromagnesita**, **dolomita**, **ankerita**, **huntita**, **estroncianita**, **celestina**, **barita**, **ardealita**, **brushita** i **nordstrandita**.

L'esmentada uniformitat en la composició de les roques, que de fet no afavoreix una major diversitat mineral, no suposa en canvi cap impediment pel que fa a l'extrema diversitat d'espeleotemes que poden presentar les cavitats de les Illes Balears, donant lloc a una rica i variada representació de tipus i formes (Taula 1). Cal recordar que el terme espeleotema només es refereix a la manera en la qual es presenta un mineral dins les coves i no estrictament a la seva composició química. Aplicant aquest criteri, la calcita, que sens dubte és el constituent principal dels dipòsits més representatius que decoren les coves, no és un espeleotema; per bé que una estalactita de calcita, creixent dins una cavitat, sí que ho seria. A causa de la remarcable diversitat tipològica que mostren els espeleotemes, s'ha considerat convenient utilitzar la sistematització dels grups d'espeleotemes proposada per GINÉS (1995a) i HILL & FORTI (1997), segons la qual es diferencien els següents tipus genètics, en relació al mode en què es produeix l'aportament d'aigua: **espeleotemes de degoteig**, **espeleotemes de flux**, **espeleotemes produïts per capil·laritat**, **espeleotemes subaquàtics d'origen vadós** i **espeleotemes subaquàtics d'origen freàtic costaner**.

## Espeleotemes de degoteig

Els espeleotemes més característics i comuns formats per aigua de degoteig a l'interior de les coves (*dripstone speleothems*) són sens dubte les estalactites i estalagmites. A les cavitats de totes les Illes Balears, aquests espeleotemes són potser els més abundants i mostren una freqüència d'aparició molt elevada en la totalitat de les regions càrstiques de l'arxipèlag. La gènesi d'aquests dipòsits minerals, que segueixen un eix vertical, està controlada per la gravetat, mentre que la precipitació química del carbonat càlcic, causant del seu creixement, s'engega quan l'aigua d'infiltració, que arri-

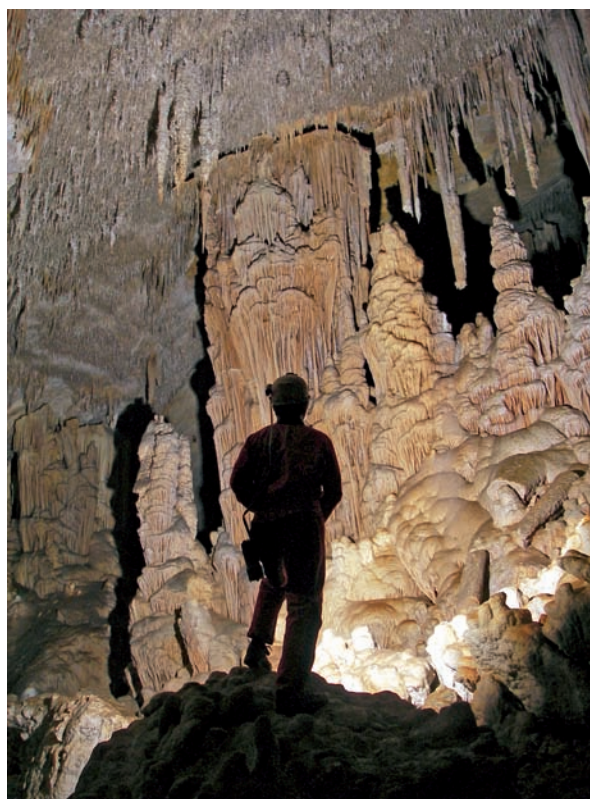


Figura 1: Vista d'un conjunt d'estalactites, estalagmites, columnes i colades parietals a les Coves del Pirata. (Foto: A. Merino)

Figure 1: Comprehensive view over stalactites, stalagmites and columns along with massive flowstone in Coves del Pirata. (Photo: A. Merino)

ba al sostre de la cova després d'haver circulat a través de les fissures de la roca, desprèn diòxid de carboni per tal de reajustar-se a la disminució de la pressió parcial d'aquest gas que experimenta l'aigua en contactar amb l'aire menys confinat de la cova. La pèrdua de diòxid de carboni al voltant de la gota causa un desequilibri químic, i la sobresaturació resultant provoca la precipitació d'una petita quantitat de carbonat càlcic; es produeix així el lent creixement d'un anell de cristal·lització molt prim que, mentre les condicions siguin adients, permetrà el desenvolupament d'una estalactita. Aquest procés químic, prossegueix quan la gota cau al terra i allibera una quantitat addicional de diòxid de carboni; la precipitació del carbonat càlcic sobre el trespol de la cavitat dipositarà noves capes de cristal·litzacions, formant una estalagmita. El creixement simultani, en un mateix punt de degoteig, d'una estalactita i de la seva corresponent estalagmita pot donar lloc a la formació d'una columna, que uneix mitjançant un mateix espeleotema el sostre i el terra de la cova (Fig. 1).

L'abundància d'estalactites és un tret que comparteixen moltes coves de Mallorca i que també es pot generalitzar a la majoria de cavitats de les altres illes. Algunes de les estalactites més notables es troben a cavernes desenvolupades dins les calcàries mesozoïques de la Serra de Tramuntana i de les Serres de Llevant, com és el cas de les Coves d'Artà, però en canvi les majors densitats d'estalactites semblen anar associades a l'elevada porositat que presenten les calcarenites del



Miocè superior de la Marina de Manacor, com succeeix a les Coves del Drac. Entre les varietats d'estalactites més freqüents i peculiars cal destacar les anomenades estalactites fistuloses (*soda straws*), que estan constituïdes per tubs cilíndrics molt prims que tenen un conducte interior buit de menys de 9 mm de diàmetre (Fig. 2). Es tracta de l'espeleotema que potser presenta una distribució més ubiqüa, si bé els principals boscos d'estalactites fistuloses es localitzen a la Cova des Pas de Vallgornera (Migjorn de Mallorca), on arriben a cobrir notables extensions de les seves voltes i on no és gens excepcional trobar exemplars de 3 m de longitud. A l'oest de Menorca, la Cova de sa Tauleta destaca també per la gran quantitat d'estalactites d'aquest tipus que decoren les seves sales.

Les estalagmites i columnes són espeleotemes de degoteig que es formen en condicions molt semblants i que també són generalment abundants a les coves riques en estalactites. Gairebé totes les cavitats balears contenen estalagmites de diverses formes i mides. Alguns notables conjunts d'espeleotemes formats per boscos d'estalagmites isodiamètriques de dimensions mitjanes, constitueixen una part molt significativa del paisatge subterrani de les caveres del Migjorn de Mallorca, com és el cas de les Coves del Drac (GINÉS & GINÉS, 1992) i la Cova des Pas de Vallgornera (MERINO, 2000), però

en altres coves, com ara la Cova Genovesa, el sistema de coves Pirata-Pont-Piqueta i el sistema Gleda-Camp des Pou, moltes estalagmites romanen actualment submergides sota les aigües freàtiques del nombrosos llacs que caracteritzen a aquesta regió càrstica (GRÀCIA *et al.*, 2003a, 2006, 2010). A les cavitats de la Serra de Tramuntana els boscos d'estalagmites isodiamètriques no són tan comuns, però en canvi és freqüent trobar estalagmites còniques de grans dimensions, com succeeix a la Cova de sa Campana i a la Cova de Cornavaques. Encara que no és possible generalitzar, sembla que el desenvolupament dels espeleotemes de degoteig no sigui tan extremadament abundant a les coves i avencs de la Serra de na Burguesa, si bé les grans columnes de l'Avenc de sa Moneda i de l'Avenc de s'Embut són prou destacables (BARCELÓ, 1992; BARCELÓ *et al.*, 1998) (Fig. 3); i aquesta tendència pareix repetir-se a altres indrets de la principal serralada de Mallorca. L'abundància d'estalactites, estalagmites i columnes es manifesta d'una manera rellevant a les Coves d'Artà, a l'extrem més oriental de Mallorca. La Cova des Frare, a l'illa de Cabrera, conté un conjunt d'estalagmites i columnes al voltant d'una gran sala. Finalment, a l'illa de Menorca destaquen les estalactites, estalagmites i columnes presents a la Cova de s'Aigo, la Cova des Màrmol i la Cova de na Megaré (ARNAU *et al.*, 2008), localitzades als ma-



Figura 2: Espectacular bosc d'estalactites fistuloses on s'hi pot apreciar la naturalesa translúcida dels espeleotemes. Cova des Pas de Vallgornera. (Foto: A. Merino)

Figure 2: Impressive soda straw forest where the translucent nature of these speleothems is clearly visible. Cova des Pas de Vallgornera. (Photo: A. Merino)

terials calcarenítics del Miocè superior de Cala Blanca, a prop de Ciutadella.

Les banderes (*draperies*) són espeleotemes que pengen de les parets en volada o dels sòtils d'un gran nombre de cavernes i que es formen quan les aigües de goteig van regalimant, formant petits filets mentre romanen aferrades a l'extravertical de la roca, fins que arriben a degotar. Depenent de les irregularitats de les superfícies de roca, i a mesura que aquests espeleotemes mixtes (de flux i degoteig) van creixent, les banderes desenvolupen plecs molt sinuosos que les hi confereixen un aspecte força característic. Les banderes són bastant freqüents a les cavitats balears, i més especialment a Mallorca.

Un darrer tipus d'espeleotema de degoteig que està present a alguns avencs i coves de les illes (MERINO, 2006) són les conulites (*conulites*). Consisteixen en petits tubs, de forma cilíndrica o cònica, que es formen allà on un goteig d'aigua cau de manera continuada sobre un sòl de material tou o poc consistent. L'impacte de les gotes remou i desplaça part dels materials i n'excava un tub. Al mateix temps, les parets d'aquests pouets queden folrades de carbonat càlcic, que precipita a causa de l'escapament del diòxid de carboni, com si es tractés d'una estalagmita. Això dóna origen a una mena de closca interior rígida, que posteriorment pot quedar al descobert com a conseqüència de la retirada, per erosió, dels materials adjacents.

## Espeleotemes de flux

Quan les aigües d'infiltració, sobresaturades en bicarbonat càlcic, s'escorren sobre les parets o el terra d'una caverna, produint un flux més aviat laminar, es disposen uns tipus d'espeleotemes que s'anomenen amb el terme genèric de colades (*flowstone speleothems*). Es tracta de formacions que poden ocupar grans superfícies i que, a petita escala, estan constituïdes per successives capes, generalment molt primes, de petits cristalls que van creixent perpendiculars a la superfície per on flueix l'aigua. Com a conseqüència de la gran varietat de situacions en què pot tenir lloc aquesta modalitat de precipitació química, s'originen innumerables formes, que es poden agrupar amb un criteri molt simple en colades parietals i colades pavimentàries, depenent de si recobreixen les parets o el trespol de les coves (Fig. 4). Les formes mimètiques que es poden reconèixer a moltes colades són objecte d'atenció preferent a les coves turístiques, especialment en el cas de les colades parietals, que sovint recorden cascades, boscos i orgues. També poden presentar una àmplia gamma de colors i, junt amb els omnipresents espeleotemes de degoteig, abans esmentats, constitueixen la part més important de la decoració del paisatge subterrani de les caveres més apreciades pel turisme de masses.

Des d'un punt de vista més estrictament geològic i estratigràfic, cal destacar que les colades poden assolir gruixes molt importants i, fins i tot, poden arribar a colmar galeries. El seu creixement tendeix a cobrir i fossilitzar sediments més antics i a englobar fragments de roca i altres espeleotemes, especialment pel que fa a les



Figura 3: Magnífica columna de petit diàmetre; al fons s'hi pot apreciar un grup potent de columnes separades del sostre per l'efecte de moviments de subsidència del trespol. Avenc de s'Embut. (Foto: A. Merino)

Figure 3: Excellently-made column of small diameter; at the back a huge group of columns separated from the ceiling due to adjustment movements of the floor can be seen. Avenc de s'Embut. (Photo: A. Merino)

colades pavimentàries, com succeeix a la Cova des Fum (GINÉS & FIOL, 1981). Amb molta freqüència, les colades pavimentàries poden recobrir i emascarar grans acumulacions de blocs caiguts a causa dels esfondraments que afecten les voltes de la majoria de coves. Per això, a mesura que els processos d'esfondrament provoquen amuntegaments inestables de blocs i es produeixen els consegüents fenòmens d'assentament al terra de les sales de nombroses coves, es produeixen trencaments dels espeleotemes, i resulta molt significativa l'aparició de paviments fracturats i desplaçats, formació d'esquerdes a les crostes estalagmítiques, basculament de massissos estalagmítics i ruptura de columnes.

De manera general, les colades són espeleotemes molt abundants a la immensa majoria de cavitats de totes les Balears. A més dels típics exemples, representats per les coves turístiques, com ara les Coves del Drac i les Coves de Campanet, són nombroses les caveres mallorquines que mostren espectaculars conjunts de colades, tant pel que fa a les dimensions que presenten com en consideració a la varietat morfològica que exhibeixen per tot arreu.



## Espeleotemes produïts per capil·laritat i formes botrioïdals

Les aigües d'infiltració, que percolen lentament aprofitant les diminutes fissures i els porus de mida molt petita que presenta la roca, són les causants d'un seguit d'espeleotemes que no mostren cap orientació vertical preferent, però que afegeixen a la seva trajectòria erràtica unes morfologies tan característiques com diversificades. Moltes d'aquestes formes corresponen als espeleotemes que tradicionalment s'han agrupat amb el nom d'estalactites excèntriques, però també inclou una considerable varietat de formes coral·loides i arraimades. La precipitació del carbonat càlcic es produeix al voltant de porus molt petits, a partir de solucions que traspuen molt lentament a través de les parets de les cavitats (*seepage water speleothems*); en aquestes condicions, el creixement dels petits espeleotemes pot presentar girs que depenen més de les forces que actuen a nivell dels processos de cristal·lització que de la manera com la gravetat determina el pas de l'aigua d'infiltració i el seu flux, molt més ràpid i necessàriament descendent. Quan l'aportació d'aigua d'infiltració experimenta variacions al llarg del temps, es produeix una alternança entre les forces gravitacionals i les forces originades per capil·laritat (PALMER, 2007), de tal manera que les formes resultants poden ser molt més complexes. Com a conseqüència de tots aquests processos físico-químics, així com de la porositat de la roca i de distints paràmetres microclimàtics, s'originen una munió de tipus d'espeleotemes que mostren una aclaparadora diversitat morfològica. Això val tant pel que fa a les estalactites excèntriques com per a tot el conjunt de formes botrioïdals (concrecions en forma de raïm) i coral·loides, que recobreixen sostres i parets, i fins i tot les estalagmites i colades que constitueixen el trespol de moltes coves de les Illes Balears.

Dins de l'ample grup de les estalactites excèntriques, les quals es caracteritzen per constituir espeleotemes allargassats que creixen generalment des del sòl o les parets de les cavitats, cal distingir diferents tipologies de difícil classificació. La majoria d'excèntriques presenten formes corbades, més o manco helicoïdals, motiu pel qual s'utilitza preferentment el terme *helictite* (*helictite*) per a la seva descripció (Fig. 5). Algunes varietats, generalment de major mida, creixen quasi perpendiculars a la superfície i mostren trajectòries més aviat anguloses, i de vegades amb branquillons que les confereixen forma de cornamenta (*antler helictites*); és el cas d'alguns ramells d'excèntriques de la Cova de sa Campana (MIR & TRIAS, 1973) (Fig. 6) i de la Cova des Pas de Vallgornera (MERINO, 2006). Però la immensa major part de les helictites de les coves mallorquines són més petites i mostren trajectòries molt sinuoses i cargolades. Entre elles cal distingir helictites filiformes, extremadament primes, helictites vermiformes, retorçudes i una mica més gruixudes, i fins i tot heligmites, similars a les anteriors però que creixen des del terra. Es tracta d'un conjunt d'espeleotemes bastant comú a bona part de les caveres de Mallorca, i recentment varies localitats riques en helictites han estat objecte d'alguns treballs descriptius que mostren la presència d'excel·lents exemples d'helic-



Figura 4: Colades parietals de notable desenvolupament que cobreixen la paret d'un pou a la Cova de sa Bassa Blanca. (Foto: A. Merino)

Figure 4: Flowstones of remarkable development covering the wall of a pit in Cova de sa Bassa Blanca. (Photo: A. Merino)

tites, tant a les calcàries mesozoïques de la Cova de ses Llàgrimes (GRÀCIA *et al.*, 2003b) com a les calcarenites del Miocè superior de la Cova des Pas de Vallgornera (MERINO, 2006). D'altra banda, les Coves dels Hams deuen el seu nom a les concrecions excèntriques, moltes d'elles helictites, que constitueixen el seu principal atractiu turístic. A l'illa de Menorca són remarcables les agrupacions d'helictites que es troben a la Cova de na Megaré i a la Cova de sa Tauleta (ARNAU *et al.*, 2008).

A més de les estalactites excèntriques, dins d'aquest ample grup de morfologies més o manco erràtiques, cal incloure les anomenades formes botrioïdals i els coral·loides; la gènesi de les quals sembla lligada a complexes interaccions entre fenòmens de capil·laritat i la probable aportació d'aerosols causats per esquitxos produïts a causa del degoteig zenital. Es tracta, en general, de petits espeleotemes d'aspecte nodular (entre uns pocs mil·límetres i un parell de centímetres), que freqüentment apareixen formant raïms de formes globulars o bé sobresurten amb diminuts peduncles o branquillons que els donen una aparença més aviat coral·lina (Fig. 7). Es poden desenvolupar sobre qualsevol superfície, recobrint parets, sostres, trespols amb diferents sediments,

blocs caiguts o fins i tot espeleotemes, com ara colades i estalagmites. A més de les localitats mallorquines citades a la bibliografia disponible, com és el cas de les Coves de Garrafa, Es Bufador de Soller, les Coves de Gènova o la Cova des Mirador, cal esmentar també alguns altres exemples publicats recentment, com els espeleotemes botrioidals de la Cova Nova de Son Lluís (GINÉS & GINÉS, 2006), la Cova des Coral-loides (GINARD *et al.*, 2009) i la Cova des Pas de Vallgornera (MERINO, 2006). La Cova de na Megaré, a l'extrem occidental de Menorca, conté una bona representació d'aquests espeleotemes (ARNAU *et al.*, 2008).

En certes circumstàncies poden intervenir també processos d'evaporació produïts com a conseqüència de petits corrents d'aire o de variacions molt subtils dels percentatges d'humitat relativa dins l'atmosfera de les cavitats; la precipitació de carbonat càlcic (o també d'altres minerals) es veuria afavorida tant per la pèrdua de diòxid de carboni com per l'eventual evaporació, que es produiria preferentment als microrelleus i a les voreres més afectades pels tènues fluxos d'aire. Aquest és el cas de les anemolites de l'Avenc de Fra Rafel i de la Cova de sa Campana (GINÉS, 1995a). Entre els espeleotemes poc freqüents que també estan relacionats amb aquests mecanismes de precipitació química cal esmentar dues varietats que van associades amb una

determinada mineralogia, com ara les flors de guix (*cave flowers*) i les antodites de cristalls aciculars d'aragonita (*frostwork*), que han estat documentades recentment a la Cova des Pas de Vallgornera (MERINO, 2007).

Un altre espeleotema d'aquesta classe que destaca per la seva singular complexitat són les anomenades toveres (*cave rims*). Es tracta d'estructures concoïdals, de dimensions mitjanes, que es desenvolupen per sobre dels llavis de forats o esquerdes que s'obren al terra d'algunes galeries (Fig. 8). La forma de les projeccions que delimiten les toveres és molt irregular i tendeixen a envoltar els forats de manera que els seus caires - d'entre 1 i 4 cm de gruixa - presenten dues cares d'aspecte ben distint: la part interna sol ser més llisa i fina, mentre que la part externa és més granelluda i pot estar recoberta de petits coral·loides. La gènesi de les toveres sembla estar relacionada amb els moviments d'aire que es produeixen entre dues galeries situades a diferents nivells, quan el nivell de galeries inferior està en contacte amb masses d'aigua que aporten humitat a l'aire des d'avall. Aquest fet podria promoure el creixement de les toveres mitjançant diversos mecanismes de condensació-corrosió. Magnífics exemplars d'aquest tipus d'espeleotema es troben distribuïts al llarg de diversos indrets a la Cova des Pas de Vallgornera (MERINO *et al.*, 2009a i 2009b).



Figura 5: Conjunt d'helictites filiformes que creixen des d'una fractura oculta que afecta a una colada pavimentària. Cova des Pas de Vallgornera. (Foto: A. Merino)

Figure 5: Group of filamental helictites growing from a covered fissure affecting a flowstone. Cova des Pas de Vallgornera. (Photo: A. Merino)





Figura 6: Magnífic conjunt d'helictites en forma de banya desenvolupades sobre la paret d'una sala de la Cova de sa Campana. (Foto: D. Mayoral)

Figure 6: Magnificent assemblage of antler helictites developed over a wall in a chamber in Cova de sa Campana. (Photo: D. Mayoral)

Els dipòsits de *moonmilk* estan lligats genèticament amb les aigües de percolació que traspugen a través de la microporositat de la roca. El *moonmilk* constitueix una mena de recobriment de textura molt variable, constituït per una massa esponjosa, tova, de consistència més aviat pastosa, i que generalment conté un elevat percentatge d'aigua; per això, quan es troba amarat d'aigua té un tacte semblant a la mantega, però si està dessecat té una aparença pulverulenta que recorda al talc. Es troba freqüentment als sostres, parets i blocs caiguts de moltes cavitats balears i està format per agregats microcristal·lins de composició diversa, encara que les anàlisis fetes fins ara amb mostres de coves de Mallorca només han pogut confirmar la presència de carbonat càlcic.

Finalment, cal destacar l'existència d'un altre tipus d'espeleotema, molt particular, que evidencia una propera relació genètica amb els tipus anteriorment esmentats a causa de la manera com es produeix l'arribada de l'aigua; és a dir, mitjançant petites aportacions d'aigües de percolació que no produeixen degoteig continu i que en canvi provoquen el creixement d'un espeleotema ascendent. Es tracta dels anomenats discos (*shields*), que formen una complexa estructura ovalada o quasi circular, consistent en dos discos paral·lels separats entre si per una diminuta fissura a través de la qual petites quantitats d'aigua assoleixen el seu vorell i precipiten

carbonat càlcic al seu voltant. Apareixen ocasionalment a diverses cavitats de Mallorca desenvolupades en distintes litologies, però sens dubte la millor representació de discos, amb alguns exemples prou espectaculars, es troba a les Coves d'Artà (GINÉS, 1995a).

## Espeleotemes subaquàtics d'origen vadós

La zona vadosa, també anomenada zona d'infiltració (*free-draining percolation zone*, segons FORD & WILLIAMS, 2007), es caracteritza pel trànsit vertical de les aigües sota l'efecte de la gravetat. El descens de les aigües d'infiltració ocasiona la formació d'embassaments temporals d'aigua, de molt variables dimensions, allà on localment es va acumulant l'aigua que degota o s'escola des de dalt junt amb l'aigua que s'escorre sobre el terra de les coves en forma de làmines o filets. Mentre les aigües vadoses romanen emmagatzemades formant tolls, poden créixer cristallitzacions subaquàtiques i es poden desenvolupar espeleotemes ben particulars. Una interessant varietat d'ells són les concrecions pisolítiques o



perles de les cavernes (*cave pearls*), que es troben ocasionalment a coves de Mallorca i que han estat objecte d'alguns estudis, entre els que destaca el d'AUROUX (1985). Sens dubte, els espeleotemes més representatius formats per les acumulacions d'aigua vadosa són els gours (*gours*, segons la versió catalanitzada que es proposa a RIBA, 1997).

Els gours són espeleotemes còncaus que posseeixen una paret subvertical, o extraplomada a contrapendent, on es pot embassar temporalment l'aigua d'infiltració procedent del degoteig o dels petits fluxos que s'escorren sobre les colades o el paviment de les coves (GINÉS, 1995a). Les seves dimensions poden fluctuar entre centímetres i metres de longitud i entre mil·límetres i metres de profunditat. La seva formació es deu inicialment a les petites perturbacions que provoquen les irregularitats del sòl sobre els fluxos laminars que circulen amb certa regularitat sobre el terra de les cavitats; d'aquesta manera comencen a formar-se uns cordons sinuosos que returen l'aigua en basses molt somes. Aleshores, el carbonat càlcic precipita més ràpid just en el caire de la paret que fa de resclosa, per on sobreix l'aigua, degut a que el flux turbulent fa augmentar la pèrdua de diòxid de carboni, i això determina el creixement en altura de la resclosa i fa que el gour vagi guanyant en profunditat i capacitat per a emmagatzemar més aigua. Aquests espeleotemes creixen generalment sobre colades pavimentàries o bé n'ocupen les depressions del trespòl de sales i galeries on s'acumula temporalment l'aigua vadosa. L'altura que assolix la paret depèn del pendent del substrat; sembla que les cubetes més somes van associades a pendents més suaus, mentre que els exemplars més fondos corresponen a les sales o galeries que tenen un major desnivell. Encara que es poden trobar gours separats i més o manco aïllats, el més freqüent és que es presentin formant grups connectats hidrològicament entre si, de manera que l'aigua que vessa d'un n'alimenta el següent aigües avall. A les coves de Mallorca són espeleotemes ben comuns i, entre els més destacables cal esmentar, per l'extensió que ocupen, els de la Cova de sa Campana (Fig. 9) i, molt especialment, els extensíssims conjunts de les galeries de la Cova des Pas de Vallgornera, on sens dubte es localitza la millor representació d'espeleotemes subaquàtics d'origen vadós de tota l'illa de Mallorca. A Menorca destaquen els gours de la Cova de na Megaré (ARNAU *et al.*, 2008).

Dins el seu interior i a les seves vores, els gours poden contenir altres varietats d'espeleotemes que tendeixen a recobrir el fons i les parets de la concavitat fins al nivell on se sol emplenar d'aigua i que, a més a més, produeixen diversos tipus de sobrecreixements que poden generar una munió de formes de recobriment molt diversificades. Es tracta d'espeleotemes mixtos que assoleixen, de vegades, una gran complexitat a causa de la sobreimposició d'etapes tant subaquàtiques com subaèries, depenent de les condicions fluctuants de dessecament i immersió que els hi afecten localment.

Entre aquestes varietats d'espeleotemes cal esmentar tots els relacionats amb la calcita flotant (*cave rafts*), que es forma amb molta freqüència sobre qualsevol superfície d'aigua estancada -siguin gours o llacs, i independentment de les seves dimensions- com a

conseqüència fonamentalment de la fuga de diòxid de carboni cap a l'atmosfera de la cova; la sobresaturació resultant causa un tranquil creixement de làmines molt primes de cristallitzacions de calcita que es mantenen surant per tensió superficial fins que el seu propi pes, en anar augmentant de mida, o sobretot les agitacions causades pel degoteig trenquen l'equilibri del pla de l'aigua i les làmines s'enfonsen i es dipositen al fons del gour. Ocasionalment, les làmines es van ajuntant entre si i, fins i tot, poden quedar adossades als vorells dels gours, el que facilita encara més que les làmines adquireixin una major gruixa, afavorides per l'estabilitat i suport que n'obtenen en quedar aferrades a les parets de la cubeta. Però també es poden produir acumulacions còniques de calcita flotant (*cave cones*) quan el freqüent degoteig sobre la superfície del llac o gour provoca l'enfonsament puntual de les làmines que s'estaven formant a ran d'aigua. Els espeleotemes subaquàtics resultants tenen aspecte d'estalagmita, encara que mostren molta porositat i escassa consistència, segons el seu grau de cimentació, així com dimensions variables i puntes més agudes que les autèntiques estalagmites. A més, als espeleotemes relacionats amb la calcita flotant, s'hauria d'afegir la recent troballa de bombolles (*cave bubbles*); es tracta de minúscules concrecions de carbonat càlcic, de forma ovoïdal i uns 5 mm de diàmetre, que suren formant grans grups sobre la superfície tranquil·la i quieta d'un petit gour de la Cova des Pas de Vallgornera (MERINO, 2007) (Fig. 10).



Figura 7: Conjunt de coral·loides sobre una colada estalagmítica a la Cova Nova de Son Lluís. (Foto: A. Merino)

Figure 7: Group of coralloids covering a flowstone in Cova Nova de Son Lluís. (Photo: A. Merino)



Figura 8: Toveres desenvolupades sobre el trespol d'una galeria a la Cova des Pas de Vallgornera. (Foto: A. Merino)

Figure 8: Cave rims developed in a passage floor in Cova des Pas de Vallgornera. (Photo: A. Merino)

Uns altres espeleotemes ben curiosos es desenvolupen horitzontalment en forma de plats (*cave cups*); es tracta de concavitats aplanades, d'aspecte circular o de vegades ovalat i mida més aviat petita -entre 1 i 20 cm-, que tant es poden trobar al fons dels gours com adossats en diferents altures a les parets del seu interior (MARSART, 2004). Els que es formen al fons solen presentar una mena de peduncle de subjecció que correspon a l'extrem del con invertit que delimita la seva geometria, mentre que els que creixen enganxats pels seus costats a les parets es disposen en conjunts que indiquen successius nivells assolits per l'aigua dins els gours. La part superior del plat és generalment llissa, a diferència de la part inferior que es mostra recoberta de vistosos cristalls de calcita. D'una manera molt semblant, els relleixos o cornises (*shelfstones*) són espeleotemes plans que apareixen associats als vorells dels gours o que voregen, ells mateixos, d'altres espeleotemes parcialment submergits dins les aigües dels gours. La seva gruixa pot ser molt variable i depèn del temps i la freqüència amb que es manté un nivell d'immersió més o manco estable emplenant el gour. El contorn en planta és gairebé sempre curvilini, i en alguns casos amb forma de mitja lluna (*crescent shelfstones*), però pot mostrar moltes irregularitats (Fig. 11). En alguns casos extrems el creixement continuat d'aquest tipus d'espeleotemes pot ocasionar el tancament quasi complet del gour amb una crosta cristal·lina i translúcida. Altres varietats de cornises es presenten al voltant d'una columna o estalagmita donant lloc a

palmatòries (*candlesticks*), o bé destaquen com a grans estructures circulars en forma de plats (*coke tables*), les quals creixen a partir d'aquells punts que sobresurten per damunt del nivell màxim del gour, de manera que la part inferior del plat roman llarg temps mig submergida dins les aigües que l'emplenen temporalment. Com a tendència general, les superfícies superiors d'aquests espeleotemes són llises, mentre que les superfícies interiors es caracteritzen pel desenvolupament de diverses microformes de recobriment (*coatings*) constituïdes per coral·loides o macrocristalls de calcita que li donen una aparença molt més rugosa i fins i tot aspra. El paper de l'activitat bacteriana s'ha posat recentment de manifest (MERINO & FORNÓS, 2010a) en uns espeleotemes molt particulars com són els *pool fingers* y *U-loops*.

Entre els diferents tipus de cristal·litzacions que poden recobrir per complet les parets i el fons dels gours cal destacar la calcita espàtica (*pool spar*). Es tracta de microformes que creixen i es desenvolupen per davall del nivell de l'aigua, en condicions de sobresaturació que provoquen la precipitació del carbonat càlcic, però també poden créixer just a ran d'aigua on hi ha un escapament de diòxid de carboni més immediat. Les cristal·litzacions subaquàtiques que es generen, folrant l'interior dels gours, produeixen superfícies rugoses de tipologia prou diversa, entre les quals no és difícil de trobar grans cristalls de calcita, de vegades molt ben desenvolupats. MERINO (2006) descriu alguns exemples de cristal·litzacions d'hàbit romboèdric (*rhombohedral spar*), a més de cristalls de calcita d'aparença escalenoèdrica (*dogtooth spar*), als nombrosos gours de la Cova des Pas de Vallgornera.

La presència a l'esmentada Cova des Pas de Vallgornera d'una excepcional quantitat de gours, de característiques i dimensions també excepcionalment diverses, ha fet que tot el conjunt de formes subaquàtiques d'origen vadós compti ara a Mallorca amb un renovat interès, tant des del punt de vista morfològic com també estètic. La cavitat supera en l'actualitat els 67 km de desenvolupament i una part molt significativa del terra de les seves sales i passatges estan ocupades per gours (MERINO *et al.*, 2006, 2007, 2008 i 2009a; GRÀCIA *et al.*, 2009). Els gours, així com la gran varietat d'espeleotemes associats a ells, són especialment abundants a les grans galeries del nivell superior de les Noves Extensions de la cova (Sector de Gregal, Sector Tragus, etc.), i això suposa conseqüentment molts de quilòmetres de galeries amb una rica representació d'espeleotemes d'aquestes tipologies.

## Espeleotemes subaquàtics d'origen freàtic costaner

Encara que la zona freàtica d'alguns sistemes càrstics pot presentar condicions geoquímiques aptes per a la deposició d'espeleotemes subaquàtics, les publicacions disponibles sobre espeleotemes freàtics són molt escasses, i només excepcionalment es fa referència explícita a la gènesi d'alguns espeleotemes dins aquesta zona



hidrogeològica del carst (caracteritzada per romandre permanentment saturada d'aigua subterrània, és a dir per sota del nivell freàtic). Nogensmenys, en el cas de les Illes Balears, són nombroses les cavitats càrstiques costaneres que presenten llacs freàtics, d'aigües més o manco salabroses, on es produeix actualment precipitació de carbonats i on creixen espeleotemes prou singulars a ran -o lleugerament per davall- del pla de les aigües freàtiques. Aquest medi geoquímic molt peculiar és el resultat de la inundació d'antigues sales i galeries dels sistemes càrstics litorals com a conseqüència de la pujada del nivell de la mar durant l'Holocè, segons s'ha pogut confirmar amb mètodes de datació radiomètrica per TUCCIMEI *et al.* (2009, 2010 i 2011). Coves afectades per aquests processos d'inundació postglacial són ben conegudes a la costa sud-oriental de Mallorca, però també s'hi troben a Menorca, Formentera, Dragonera i al subarxipèlag de Cabrera, si bé no tots els llacs costaners mostren necessàriament evidències de formació d'espeleotemes freàtics.

Els estudis dels espeleotemes subaquàtics d'origen freàtic a les coves costaneres de Mallorca es varen iniciar fa quasi quaranta anys i es focalitzaren inicialment a la Cova de sa Bassa Blanca (Alcúdia) i posteriorment a la Cova A de Cala Varques (Manacor). Mentre en el primer cas es tractava d'un excepcional registre fòssil

de paleonivells freàtics que es remunten fins al Pleistocè Mitjà (GINÉS & GINÉS, 1974), en el segon cas la ubicació dels espeleotemes era coincident amb el nivell actual i mostrava una relació morfològica molt evident amb les petites oscil·lacions actuals del pla de l'aigua freàtica, controlades per les mareas i els canvis baromètrics (POMAR *et al.*, 1979); motiu pel qual es va introduir el terme "espeleotemes epiaquàtics", que intenta especificar el seu mecanisme genètic, lligat directament a la superfície fluctuant de les aigües dels llacs costaners. Emperò cal distingir els espeleotemes epiaquàtics costaners de les cornises o relleixos (*shelfstone*), que voregen els gours, i evitar-ne confusions malgrat les seves notables similituds morfològiques. Tant els uns com els altres comparteixen un creixement preferent que delimita relleixos horitzontals perfectament anivellats i mostren recobriments molt semblants constituïts per una gran diversitat de microformes subaquàtiques. Tanmateix, la principal diferència consisteix en la secció transversal, que als espeleotemes epiaquàtics tendeix a ajustar-se a una forma de campana de Gauss. Més recentment (VESICA *et al.*, 2000 i TUCCIMEI *et al.*, 2009), per tal de fer-ne una difusió més eficaç d'aquests espeleotemes dins l'àmbit del Quaternari marí, s'ha introduït a la bibliografia el terme *phreatic overgrowths on speleothems* (POS), que en resulta pràcticament sinònim.



Figura 9: Una part del trespòs de la Sala des Gegants a la Cova de sa Campana està coberta de gours. (Foto: D. Mayoral)

Figure 9: A section of the Sala des Gegants in Cova de sa Campana is floored with gours. (Photo: D. Mayoral)

La descripció tipològica, mineralògica i textural dels espeleotemes freàtics d'origen costaner és complexa i obliga a diferenciar un ampli conjunt de tipus i formes que han estat sistematitzades al llarg d'un seguit de publicacions (GINÉS & GINÉS, 1974; POMAR *et al.*, 1975, 1976 i 1979; GINÉS, 1995a; GINÉS *et al.*, 1981 i 2005). La classificació més recent, elaborada per GINÉS *et al.* (2005), enumera una associació d'espeleotemes constituïda per: calcita flotant, cons de calcita flotant (estalagmites còniques subaquàtiques), bandes de nivell que formen engrossiments a les parets o al voltant de qualsevol suport (*POS*), estalactites boterudes (de base plana i aspecte globular) i una gran varietat de revestiments subaquàtics (*subaqueous coatings*), que abraça des dels macrocristal·lins de calcita romboèdrica fins als llisos i d'aspecte vellutat formats per finíssimes agulles d'aragonita, passant per diversos revestiments botrioidals i d'aspecte coral·loide. Les localitats més remarcables de les Illes Balears són, sens dubte, la Cova de sa Bassa Blanca i les Coves de Cala Varques, però també es poden apreciar excel·lents exemples a les Coves del Drac i d'Artà, així com a les galeries submergides de la Cova de sa Gleda (GRÀCIA *et al.*, 2007) i també a alguns sectors de la Cova des Pas de Vallgornera, on la presència de formes subaquàtiques tant d'origen vadós com d'origen freàtic destaca per la seva extraordinària varietat i abundància.

## Factors que influeixen sobre la riquesa i varietat d'espeleotemes carbonatats de les cavitats de les Illes Balears

El creixement dels espeleotemes depèn de diversos factors, entre els quals cal destacar les característiques litològiques de les calcàries i les condicions climàtiques. Els distints tipus de roques carstificables que formen les Balears, abracen des de les dolomies triàsiques i les calcàries massives del Lias inferior, passant per les calcàries i conglomerats burdigalians, fins als dipòsits tabulars postorogènics constituïts per calcarenites del Miocè superior. Tots aquests dipòsits carbonatats presenten una permeabilitat molt diversa, en part com a conseqüència dels distints ambients deposicionals en què es varen formar, però també a causa dels esdeveniments tectònics i dels processos geològics que posteriorment els han afectat al llarg del temps; la porositat inicial de la roca, les línies de fracturació dominants i el progressiu desenvolupament de conductes càrstics, condicionen la infiltració d'aigua des de la superfície, així com també el trànsit de les aigües càrstiques a través de les coves i dels sistemes de drenatge subterranis. A més dels condicionants estrictament geològics que hi determinen les



Figura 10: Grup de bombolles, *cave bubbles*, format per multitud d'individus que es troben surant a les aigües d'un gour. Cova des Pas de Vallgornera. (Foto: A. Merino)

Figure 10: Assemblage of cave bubbles formed by dozens of individuals floating on a gour. Cova des Pas de Vallgornera. (Photo: A. Merino)



Figura 11: Cornises en forma de mitja lluna al voltant d'un gour, sobre les que s'hi han dipositat làmines de calcita flotant. Cova des Pas de Vallgornera. (Foto: A. Merino)

Figure 11: Crescent shelfstones ringing a gour; cave rafts deposited on them can be identified. Cova des Pas de Vallgornera. (Photo: A. Merino)



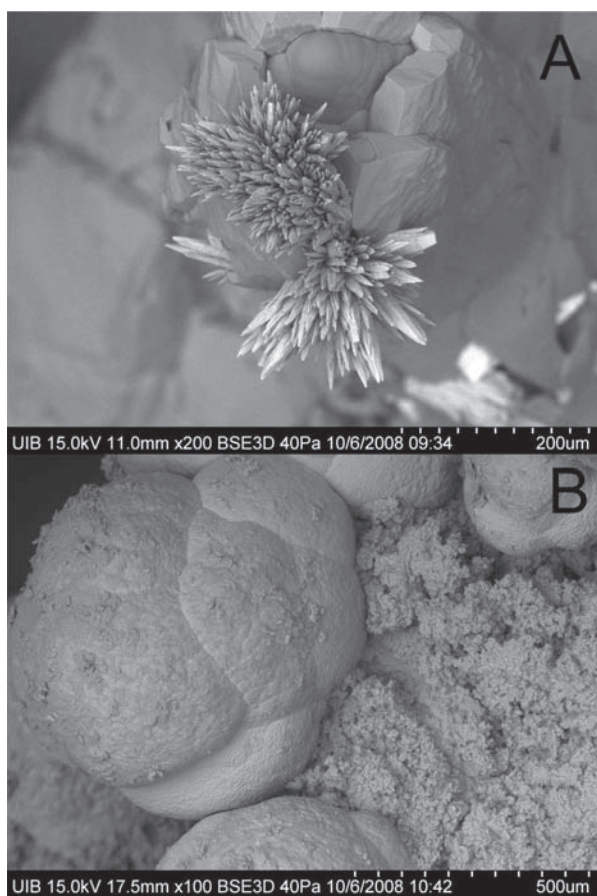


Figura 12: Cristalls d'estroncianita (A) i bolles d'huntita (B).

Figure 12: Strontianite crystals (A) and huntite balls (B).

modalitats d'arribada de l'aigua causant de la formació d'espeleotemes, les diferents localitzacions geogràfiques i topogràfiques on es desenvolupen les cavitats en produeixen molts d'ambients subterranis, amb microclimes prou diversificats (GINÉS, 1995a).

Es important subratllar d'una manera molt particular algunes implicacions bioclimàtiques que tenen una certa rellevància en la formació dels espeleotemes. Com que l'arxipèlag balear es troba situat a una latitud mitjana dins de la Mediterrània occidental, des del Pleistocè inferior fins a l'Holocè s'han produït un seguit de fluctuacions climàtiques que corresponen a una alternança, més o manco cíclica, d'etapes fredes (glaciacions) separades per altres períodes alternatius càlids (interglacials). Encara que durant les glaciacions hi dominaven els esdeveniments climàtics de signe fred, mai varen significar un aturament dels processos càrstics i del creixement d'espeleotemes per causa del gel, mentre que en canvi els moments més temperats i fins i tot càlids es varen perllongar durant lapses de temps considerables. La recurrència de condicions climàtiques a bastament càlides i humides, que en resulten favorables per a la formació d'espeleotemes, ha estat sens dubte decisiva per al creixement d'aquests dipòsits a les coves de les Illes Balears, dins un context bioclimàtic mediterrani, caracteritzat per precipitacions intenses, temperatures relativament altes, acceleració estacional dels processos biològics a

nivell edàfic i elevada producció de diòxid de carboni i àcids orgànics. Això fa que les aigües que s'infiltringen esdevinguin molt agressives, i adquireixin la capacitat de dissoldre una quantitat significativa de roca calcària que finalment serà dipositada a l'interior de les cavitats quan es donin les condicions físico-químiques adients.

El desenvolupament d'un espeleotema obeeix, entre d'altres factors, a la rapidesa i abundància amb la qual arriben a un determinat punt de la cova els materials dissolts i al nivell de sobresaturació en que es troben les diferents substàncies químiques que porten en dissolució les aigües d'infiltració. En general la taxa de precipitació del carbonat càlcic ve determinada per la pèrdua d'una part del diòxid de carboni que du en dissolució l'aigua que alimenta l'espeleotema, i és per això proporcional al grau de sobresaturació en calcita que en presenta; la taxa de creixement es veu també incrementada per la temperatura, essent fins a 8 vegades major quan la temperatura de l'aigua passa de 0° a 25°C (PALMER, 2007). Aquests condicionaments es donen de manera molt favorable a les coves de l'arxipèlag balear, fet que explica en gran part l'abundància i varietat d'espeleotemes de composició carbonatada que adornen les cavitats.

## Les altres mineralitzacions

Com ja s'ha comentat abans, recentment (ONAC *et al.*, 2005; MERINO *et al.*, 2009a) s'ha emprat una recerca sistemàtica de nous minerals a les cavitats balears, que es presenten en unes proporcions volumètriques molt petites i amb una escassa presència areal però que constitueixen una font d'informació excepcional. Des d'un punt de vista científic permeten reconèixer els processos que han actuat a les coves i que per tant els han generat. Entre aquests podem diferenciar dos grans blocs: els relacionats amb els processos de tipus hipogènic presents en algunes cavitats de Mallorca, com ha estat constatat recentment (GINÉS *et al.*, 2008, 2009a; MERINO *et al.*, 2009a; MERINO & FORNÓS, 2010b; FORNÓS *et al.*, 2010, 2011); i els relacionats amb la interacció entre la roca encaixant, els sediments de composició argilosa i els lixivats dels excrements de les ratapinyades.

Dins d'aquest darrer bloc destaquen els minerals del grup dels fosfats, ben representats en quant a nombre d'espècies minerals reconegudes, però presents en poques cavitats. Fins ara només s'han descrit la major part d'ells a la Cova de sa Guitarreta i a la Cova de ses Rates Pinyades; però també s'han trobat algunes espècies a les Coves del Pirata i a la Cova des Drac de Cala Santanyí (ONAC *et al.*, 2005). Es tracta de hidroxiapatita, hidroxiapatita carbonatada, brushita, taranakita i ardealita. En els dos primers el radical fosfat ( $\text{PO}_4^{=}$ ) és aportat pel lixiviat del guano de les ratapinyades, que pot reaccionar en ambients neutres o lleugerament alcalins amb els carbonats de la roca encaixant (HILL & FORTI, 1997). Acostumen a trobar-se en forma de crosques o masses terroses d'algun mil·límetre fins a 4 cm de gruixa sota la cobertura del guano. L'ardealita, que és

lleugerament eflorescent, es troba espargida en forma de polsim sobre grans taques de guano i és indicadora d'un pH més àcid. La brushita es troba en forma de cristalls euhedrales d'algunes micres de mida, essent el producte final de la reacció entre solucions fosfàtiques àcides i les parets de la roca calcària o de blocs enterats pel guano en condicions molt humides. La taranakita, que es presenta en forma d'agregats fins i aplanats en forma hexagonal, precipita quant hi ha la fixació de K i Al procedents de les argiles (il·lita) dins de l'estructura fosfàtica en ambient poc àcid.

Íntimament relacionat amb aquests minerals fosfàtics, a les coves esmentades també s'ha descrit la presència de guix. Es pot presentar en forma de pasta color ocre tipus *moonmilk*, dins de les acumulacions de guano, o com a eflorescències dins d'aquestes masses quant estan molt alterades. En ambdós casos sembla que serien resultat del rentat d'aquestes masses orgàniques. Guix, però, també s'ha trobat en diverses cavitats litorals com la cova de Cala Falcó (GINÉS, 1995b), tant al terra com a les parets, en forma de petites bolles d'aparença de cotó d'alguns mil·límetres de diàmetre i formades per cristalls aciculars i fibrosos. El grup aniònic ( $\text{SO}_4^{=}$ ) procediria del ruixim marí, quan ens trobéssim amb cavitats obertes, mentre que en altres casos el guix seria el resultat de la reacció entre la roca calcària i el sulfat procedent de la mescla entre l'aigua marina i l'aigua dolça en aquesta zona litoral.

L'altre gran bloc correspon als minerals relacionats amb els processos hipogènics que afecten algunes cavitats del Migjorn de Mallorca (Cova des Pas de Vallgornera, Cova Nova de Son Lluís). MERINO (2006, 2007) descriu a la Cova des Pas de Vallgornera un conjunt de formes entre les que destaquen les toveres, que presenten en la seva terminació superior uns precipitats en forma de corones i en la roca encaixant que els envolta uns dipòsits multicolors irregulars i d'aspecte terrós. Corresponen en la seva major part a espeleotemes carbonatats, amb característiques morfològiques molt variables i dependents de la localització respecte a l'obertura central de les toveres (basta i coral·lifforme a la part exterior, llisa i suau a l'interior). Tant a les seves parets com a les parets més properes de la cavitat on se troben les toveres s'hi pot observar com la roca calcària està meteoritzada i presenta diversos dipòsits minerals d'aparença irregular, en precipitats aïllats i en forma de crostes (MERINO *et al.*, 2009a, 2009b). Normalment formen minúsculs precipitats cristal·lins i altres productes poc comuns deguts a la meteorització de la roca calcària ocasionada per la interacció amb elements químics poc freqüents (Fig. 12). S'hi han reconegut una ampla varietat de minerals (MERINO *et al.*, 2009a, 2009b; FORNÓS *et al.*, 2010, 2011), que van des de minerals relativament comuns com el guix i alguns minerals de les argiles fins a la huntita, monohidrocalcita, estroncianita, siderita, todorokita, o la celestina. A part també s'hi ha reconegut minerals força inesperats com per exemple la barita, nordstrandita, maghmita o la paralstonita. Tot el conjunt mostra una disposició en una seqüència ordenada que va des de l'interior del conducte fins a les parets adjacents de la roca encaixant, ja fora de la tovera (FORNÓS *et al.*, 2011).

La presència de dipòsits rics en elements modera-

dament solubles en aigües anòxiques profundes i fàcils de precipitar com a òxids i hidròxids en aquífers soms oxigenats, com el Fe i Mn (LUISZER, 1997; PALMER, 2007), així com la presència d'elements com  $\text{S}^{3+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , o inclús  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zr}^{4+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$  i La, que són molt poc comuns i que els trobem associats amb les morfologies que han estat interpretades com a de gènesi hipogènica (MERINO, 2007; GINÉS *et al.*, 2009a, 2009b), especialment les relacionades amb les formes que poden ser considerades com a punts d'alimentació (*feeders* en el sentit de KLIMCHOUK, 2007), fan d'aquesta associació de minerals, que es troben en forma de crostes i superfícies d'alteració, una prova més de la participació dels processos d'origen profund en la seva gènesi. L'activitat biològica però no pot ser descartada, al menys en part, per als dipòsits formats per sediments arenosos fins molt obscurs, rics en Fe i Mn i molt poc cristal·lins, que es troben freqüentment també en el terra o parets subhoritzontals d'alguns passadissos relacionats o alternant amb argiles i llims vermells.

Les associacions minerals presents, donada la monòtona geologia carbonatada de la zona, indiquen que determinades solucions, riques especialment en Sr, Ba, Mn i Al d'origen hipogènic, tot reaccionant amb la roca encaixant, han de ser les responsables de les associacions minerals descrites. Aquesta recàrrega d'aigües profundes hipogèniques, que estarien relacionades amb anomalies geotermals degudes a la fracturació distensiva neògena, ja ha estat posada de manifest amb la presència d'aigües termals a Mallorca per LÓPEZ & MA-TEOS (2006).

Així doncs, la gènesi d'aquests dipòsits minerals, que podríem considerar a hores d'ara com a extraordinaris dins del carst de les Balears, estarien relacionats amb la participació de processos profunds i episòdics, per la qual cosa s'haurien de tenir presents en establir l'evolució geomorfològica d'algunes cavitats.

## Agraïments

Un agraïment merescut a tots els companys que han ajudat d'una manera o una altra en les labors de camp al llarg de molts mesos de treball. A Daniel Mayoral per cedir amablement algunes de les fotografies que apareixen en aquest treball. A la Conselleria de Medi Ambient del Govern Balear pels permisos concedits i el seu suport.

El present treball és una contribució al projecte de recerca finançat pel *Ministerio de Ciencia e Innovación*, CGL2010-18616/BTE.

## Bibliografia

- ARNAU, P.; LAÍNEZ, N.; ZUBILLAGA, M. & GÓMEZ, D. (2008): Les coves de Cala Blanca (Ciutadella de Menorca). *Endins*, 32: 105-138.
- AUROY, L. (1985): Concreciones pisolíticas en cavidades de Mallorca. *Endins*, 10-11: 27-31.



- BARCELÓ, M.A. (1992): Cavitats de la Serra de Na Burguesa. Zona 1: S'Hostalet (Calvià, Mallorca). *Endins* 17-18: 25-36.
- BARCELÓ, M.A.; GRÀCIA, F.; CRESPI, D.; VICENS, D.; PLA, V.; GINARD, A. & CASAS J.A. (1998): Les cavitats de la serra de na Burguesa. Zona 3; Coll des Pastors (Calvià, Mallorca). *Endins*, 22: 19-35.
- FORD, D.C. & WILLIAMS, P.W. (2007): *Karst hydrogeology and geomorphology*. Chichester, Wiley, 561 p.
- FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; GRÀCIA, F.; MERINO, A.; CIFRE, J. & HIERRO, F. (2010): Hypogene speleogenetic evidences in the development of Cova des Pas de Vallgornera (Mallorca Island, western Mediterranean). In: Andreo, B.; Carrasco, F.; Durán, J.J. & Lamoreaux, J.W. (eds), *Advances in research in karst media*, Environmental earth sciences series Springer-Verlag, Berlin, pp 349-354.
- FORNÓS, J.J.; MERINO, A.; GINÉS, J.; GINÉS, A. & GRÀCIA, F. (2011): Solutional features and cave deposits related to hypogene speleogenetic processes in a littoral cave of Mallorca Island (western Mediterranean). *Carbonates and Evaporites*, 26: 69-81.
- GINARD, A.; BOVER, P.; VICENS, D.; CRESPI, D.; VADELL, M. & BARCELÓ, M.A. (2009): Les cavitats de la Serra de Na Burguesa. Zona 9: Son Boronat-L'Hostalet (2ª part) (Calvià, Mallorca). *Endins*, 33: 105-119.
- GINARD, A.; CRESPI, D.; VICENS, D.; VADELL, M.; BARCELÓ, M.A. & BOVER, P. (2006): Les cavitats de la Serra de Na Burguesa. Zona 8: Minería al voltant des Coll des Vent (Palma, Mallorca). *Endins*, 29: 99-120.
- GINÉS, A. (1995a): Els espeleotemes de les coves de Mallorca. *Endins*, 20: 87-97.
- GINÉS, A. & FIOL, L.A. (1981): Estratigrafía del yacimiento de la Cova des Fum (Sant Llorenç, Mallorca). *Endins*, 8: 25-42.
- GINÉS, A. & GINÉS, J. (1974): Consideraciones sobre los mecanismos de fosilización de la Cova de sa Bassa Blanca y su paralelismo con formaciones marinas del Cuaternario. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 19: 11-28.
- GINÉS, A. & GINÉS, J. (1992): Las Coves del Drac (Manacor, Mallorca). Apuntes históricos y espeleogenéticos. *Endins*, 17-18: 5-20.
- GINÉS, A.; GINÉS, J. & POMAR, L. (1981): Phreatic speleothems in coastal caves of Majorca (Spain) as indicators of Mediterranean Pleistocene paleolevels. *Proc. 8th Int. Congress Speleol.*, 2: 533-536. Bowling Green, U.S.A.
- GINÉS, J. (1995b): L'endocars de Mallorca: els mecanismes espeleogenètics. *Endins*, 20: 71-86.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (2006): La Cova Nova de Son Lluís (Porreres, Mallorca). Notes sobre aspectes històrics i geo-espeleològics. *Endins*, 29: 5-24.
- GINÉS, J.; FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (2005): Els espeleotemes freàtics del Quaternari de Mallorca: aspectes morfològics, mineralògics i cristal·logràfics. In: SANJAUME, E. & MATEU, J.F. (eds.) *Geomorfologia litoral i Quaternari. Homenatge al professor Vicenç M. Rosselló i Verger*. Universitat de València. 151-165. València.
- GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; TRIAS, M.; GINÉS, A. & SANTANDREU, G. (2007): Els fenòmens endocàrstics de la zona de Ca N'Olesa: La cova de S'Onix i altres cavitats veïnes (Manacor, Mallorca). *Endins*, 31: 5-30.
- GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; GRÀCIA, F. & MERINO, A. (2008): Noves observacions sobre l'espeleogènesi en el Migjorn de Mallorca: els condicionants litològics en alguns grans sistemes subterranis litorals. *Endins*, 32: 49-79.
- GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; MERINO, A. & GRÀCIA, F. (2009a): On the role of hypogene speleogenesis in shaping the coastal endokarst southern Mallorca (western Mediterranean). In: Klimchouk, A. & Ford, D.C. (eds), *Hypogene speleogenesis and karst hydrogeology of artesian basins*. *Ukrainian Institute of Speleology a Karstology, Special Paper*, 1, Simferopol, Ukraine, pp 91-99.
- GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; MERINO, A. & GRÀCIA, F. (2009b): About the genesis of an exceptional coastal cave from Mallorca Island (Western Mediterranean). The lithological control over the pattern and morphology of Cova des Pas de Vallgornera. In: White, W.B. (ed.) *Proc. 15th Int. Congress Speleol.*, 1: 481-487. Kerrville, U.S.A.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; FORNÓS, J. J.; JAUME, D. & FEBRER, M. (2006): El sistema Pirata-Pont-Piqueta (Manacor, Mallorca): Geomorfologia, espeleogènesi, hidrologia, sedimentologia i fauna. *Endins*, 29: 25-64.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; GAMUNDÍ, P. & FORNÓS, J.J. (2010): El sistema de cavitats Gleda-Camp des Pou (Manacor, Mallorca). *Endins*, 34: 35-68.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; GUAL, M.A.; WATKINSON, P. & DOT, M.A. (2003a): Les coves de Cala Anguila (Manacor, Mallorca). I: Descripció de les cavitats i història de les exploracions. *Endins*, 25: 23-42.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; WATKINSON, P.; DOT, M.A. & LANDRETH, R. (2003b): La cova de ses Liàgrimes (Alcúdia, Mallorca). *Endins*, 25: 131-140.
- GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J.; CLAMOR, B.; FEBRER, M. & GAMUNDÍ, P. (2007): La cova de sa Gleda I. Sector Clàssic, sector de Ponent i sector Cinc-cents (Manacor, Mallorca): Geomorfologia, espeleogènesi, sedimentologia i hidrologia. *Endins*, 31: 43 - 96.
- GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J.; GAMUNDÍ, P.; CLAMOR, B.; PO-COVÍ, J. & PERELLÓ, M. A. (2009): Les descobertes sub-aquàtiques a la cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca): Història i descripció dels descobriments, hidrologia, espeleotemes, sediments, paleontologia i fauna. *Endins*, 33: 35 - 72.
- HILL, C. & FORTI, P. (1997): *Cave minerals of the world*. National Speleological Society, 238 pgs. Huntsville
- KLIMCHOUK, A.B. (2007): *Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective*. National Cave and Karst Research Institute, Special Paper, 1, Carlsbad, New Mexico, 106 pp.
- LOPEZ, J.M. & MATEOS, R.M. (2006): Control estructural de las anomalías geotérmicas y la intrusión marina en la plataforma de Llucmajor y la cubeta de Campos (Mallorca). In: Las aguas subterráneas en los países Mediterráneos. *Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, 17: 607-613.
- LUISZER, F.G. (1997): *Genesis of cave of the winds, Manitou springs, Colorado*. Unpublished Ph.D Thesis. University of Colorado, 137 pp.
- MASSART, C. (2004): Les coupelles de la grotte des Collemboles. *Regards-Spéléo Info*, 56. Belgique.
- MERINO, A. (2000): Nuevas extensiones de la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca). *Endins*, 23: 7-21.
- MERINO, A. (2006): Espeleotemas poco frecuentes y morfologías de corrosión hallados en la Cova des Pas de Vallgornera. *Endins*, 30: 49-70.
- MERINO, A. (2007): Solutional sculpturings and uncommon speleothems found in the Cova des Pas de Vallgornera, Majorca, Spain. *NSS News*, 65(9): 14-20
- MERINO, A. (2008): Nueva aportación al conocimiento de los espeleotemas y morfologías existentes en la Cova des Pas de Vallgornera. *Endins*, 32: 43 - 48.
- MERINO, A. & FORNÓS, J.J. (2010a): Presencia de Pool fingers y U-loops en la Cova des Pas de Vallgornera (Mallorca, España). *Endins*, 34: 103-108.
- MERINO, A. & FORNÓS, J.J. (2010b): Los conjuntos morfológicos de flujo ascendente (morphologic suite of rising flow) en la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca). *Endins*, 34: 85-100.
- MERINO, A.; FORNÓS, J.J.; & ONAC, B.P. (2009a): Preliminary data on mineralogical aspects of cave rims and vents in Cova des Pas de Vallgornera, Mallorca. In: White WB (ed) *Proceedings of the 15th International Congress of Speleology*, 1, Kerrville, USA, pp 307-311.

- MERINO, A.; MULET, A. & MULET, G. (2006): La Cova des Pas de Vallgornera: 23 kilòmetres de desenvolupament topogràfic (Llucmajor, Mallorca). *Endins*, 30: 29 - 48.
- MERINO, A.; MULET, A.; MULET, G.; CROIX, A. & GRÀCIA, F. (2007): La Cova des Pas de Vallgornera: 40 kilòmetres de desenvolupament topogràfic (Llucmajor, Mallorca). *Endins*, 31: 101-110.
- MERINO, A.; MULET, A.; MULET, G.; CROIX, A. & GRÀCIA, F. (2008): La Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca): arriba als 55 kilòmetres de desenvolupament topogràfic. *Endins*, 32: 33-42.
- MERINO, A.; FORNÓS, J.J. & ONAC, B. (2009b): Dades preliminars sobre la mineralogia de les precipitats associades a respiradors i toberes existents en la Cova des Pas de Vallgornera, Mallorca. *Endins*, 33: 99-104.
- MIR, F. & TRIAS, M. (1973): Sobre el karst de la Cova de sa Campana i les seves concrecions excèntriques. *III Simposium Espeleologia*. Escola Catalana d'Espeleologia - Agrupació Científica Excursionista de Mataró. 53-70. Mataró, Barcelona.
- ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (2005): Mineralogical reconnaissance of caves from Mallorca island. *Endins*, 27: 131-140.
- PALMER, A.N. (2007): *Cave Geology*. Cave books. 454 pàgs. Dayton, Ohio.
- POMAR, L.; GINÉS, A.; MOYÀ, G. & RAMON, G. (1975): Nota prèvia sobre la petrologia i mineralogia de la calcita flotant de algunes cavitats del Levante Mallorquí. *Endins*, 2: 3-5.
- POMAR, L.; GINÉS, A. & FONTARNAU, R. (1976): Les cristallitzacions freàtiques. *Endins*, 3: 3-25.
- POMAR, L.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (1979): Morfologia, estructura i origen de les espeleotemes epiacuàtics. *Endins*, 5-6: 3-17.
- RIBA, O. (1997): *Diccionari de Geologia*. Diccionari de l'Enciclopèdia. Enciclopèdia Catalana, Institut d'Estudis Catalans. 1407 p. Barcelona.
- TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; ONAC, B.P. & VILLA, I.M. (2009): Precipitation of phreatic overgrowths at the water table of meteoric-marine mixing zones in coastal cave systems: a useful tool in sea level change reconstruction. In: White W.B. (Ed.), *Proc. of 15th International Congress of Speleology, Kerrville, USA, Symposia*, part 1: 554-560.
- TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; KRAMERS, J. & VILLA, I.M. (2010): Constraining Holocene sea levels using U-Th ages of phreatic overgrowths on speleothems from coastal caves in Mallorca (Western Mediterranean). *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (7): 782-790.
- TUCCIMEI, P.; VAN STRYDONCK, M.; GINÉS, A.; GINÉS, J.; SOLIGO, M.; VILLA, I.M. & FORNÓS, J.J. (2011): Comparison of  $^{14}\text{C}$  and U-Th ages of two Holocene phreatic overgrowths on speleothems from Mallorca (Western Mediterranean): Environmental implications. *International Journal of Speleology*, 40 (1): 1-8.
- VESICA, P.L.; TUCCIMEI, P.; TURI, B.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & GINÉS, J. (2000): Late Pleistocene paleoclimates and sea-level change in the Mediterranean as inferred from stable isotope and U-series studies of overgrowths on speleothems, Mallorca, Spain. *Quaternary Science Reviews*, 19: 865-879.